

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-09

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

UNA VISIÓN HOLÍSTICA DEL SISTEMA DE PREVENCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

J. Johnny Rocha E.
Global Technology Centre - LAM
Alstom – Renewable Power
Brazil

Resumen *– Mucho se ha publicado en los últimos tiempos sobre sistemas de monitoreo y detección de descargas parciales. Se han creado, inclusive, corrientes de evaluación y diagnóstico tomando como base tales observaciones. Sin embargo, poco hemos leído en la última década sobre los progresos y la visión actual del sistema de prevención contra el surgimiento de efluvios eléctricos caracterizados por actividades de descargas parciales o por efecto corona.*

De este modo, el presente informe técnico, se propone discurrir sobre el tema iniciando por una propuesta de discernimiento entre lo que fuera efecto corona y descargas parciales.

La descripción del sistema de prevención empezará por el concepto de descargas parciales internas, su origen y recursos tecnológicos para mitigar su manifestación. Por descargas parciales internas se definirá toda actividad de campo eléctrico entre los filamentos de cobre y la pared interna del aislante principal.

Bajo el título de 'descargas parciales de interfaz' se abordará tanto el desafío de canalizar la actividad del campo eléctrico en la región interna a la ranura, entre el aislante de la bobina y la pared de la ranura. Este sistema de dreno eléctrico presenta sus desafíos y particularidades que si no fueran bien conducidas podría desencadenar una reacción en cadena de descargas parciales detectables únicamente con dispositivos especiales.

Será presentado con bastante cuidado el problema de cambio de medio ambiente a que son sometidas las bobinas en los bordes laterales del núcleo estatórico, circunstancias en que la barra pasa de estar empotrada dentro de la ranura para el aire, ocasionando un salto en forma de gradiente drástico en el campo eléctrico que circunda la cabeza de barra. Por su importancia, se hará un hincapié conceptual para caracterizar la razón y mecanismo de los sistemas anti-corona de cabeza. Se abordarán, también, posibles soluciones, sus beneficios y campos de aplicación

Para finalizar, se abordarán las descargas parciales consecuentes al proceso de producción, su caracterización y cuidados.

De esta manera se pretende contribuir para una homogenización de conceptos asociados al tema conocido como 'descargas parciales'

Palabras clave: Generadores sincrónicos, barras Roebel, sistemas de aislamiento, descargas parciales, efecto corona,

Johnny.rocha@power.alstom.com

1 INTRODUCCIÓN

Como regla general, las máquinas con voltaje nominal superior a 6000 V deben ser adecuada-mente protegidos contra el surgimiento de efluvios de efecto Corona. O, como recomienda la tecnología más reciente, prevenir las manifestaciones de descargas parciales. En verdad, como se muestra adelante, lo que se hace es mitigar la manifestación del fenómeno, una vez que el mismo es una consecuencia natural de la manipulación de altos voltajes.

El IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms – ANSI/IEEE Std 100 – establece las siguientes definiciones tanto para efecto corona como para descargas parciales:

> **Corona (1) (air).** A luminous discharge due to ionization of the air surrounding a conductor caused by a voltage gradient exceeding a certain critical value.
>
> **Corona effect.** The particular form of the glow discharge that occurs in the neighborhood of electric conductors where the insulation is subject to high electric stress.
>
> **Partial discharge.** An electric discharge which only partially bridges the insulation between conductors, and which may or may not occur adjacent to a conductor. Notes: (a) Partial discharges occur when the local electric field intensity exceeds the dielectric strength of the dielectric involved, resulting in local ionization and breakdown, Depending on intensity, partial discharges are often accompanied by emission of light, heat, sound, and radio influence voltage (with a wide frequency range) ….(d) "Corona" has also been used to describe partial discharges. This is a non-preferred term since it has other unrelated meanings.

De donde se puede inferir que se hace necesario un discernimiento cuidadoso al referirse a este tipo de manifestación. Así, en este texto presentaremos las siguientes definiciones:

> ***Descargas parciales:*** toda actividad que, en presencia de altos campos eléctricos excede la rigidez dieléctrica del aire, ionizando sus componentes. Este proceso puede ser acompañado de una manifestación visible, audible o de radio frecuencia. Muchas veces apenas observable con apoyo de instrumentos especializados.
>
> ***Efecto Corona:*** descargas parciales de efecto visible que circundan un conductor en el aire, que son el resultado del efecto de puntas o irregularidades en la superficie del conductor. Los criterios de voltaje de surgimiento y extinción, están asociados a la sensibilidad del ojo humano.

Bajo ciertas circunstancias, asociado a la presencia de ciertos materiales y altos campos eléctricos, puede ocurrir una manifestación luminiscente, no perjudicial, fácilmente confundible al ojo humano con las actividades del efecto corona. En estos casos, solo un instrumento de visión de efecto corona del tipo "corona finder" o "corona viwer" podrá dirimir esta cuestión. De donde resulta comprensible el cuidado propuesto por el IEEE al definir corona.

De esta manera, nuestra preocupación de aquí en adelante, se restringe a devanados estatoricos dotados con barras tipo Roebel, será la identificación de los lugares más favorables para el surgimiento de descargas parciales y la descripción de los métodos disponibles para mitigar tales manifestaciones.

En un generador sincrónico de alta tensión, en general superior a 6000 V, se pueden designar cuatro regiones de interés donde el ingeniero de proyecto debe concentrar su atención: a) descargas parciales internas; b) descargas parciales de interfaz; c) descargas parciales de superficie y d) descargas parciales consecuentes al proceso de producción.

2 DESCARGAS PARCIALES INTERNAS

Durante el proceso de la transposición interna de los hilos (conductores rectangulares típicamente en el orden de 2x5 mm) de las barras tipo Roebel es inevitable la formación de irregularidades superficiales que, si no fueren tomados cuidados especiales podrán transformarse en bolsas o burbujas de aire, como se indica en rojo en la figura 1.

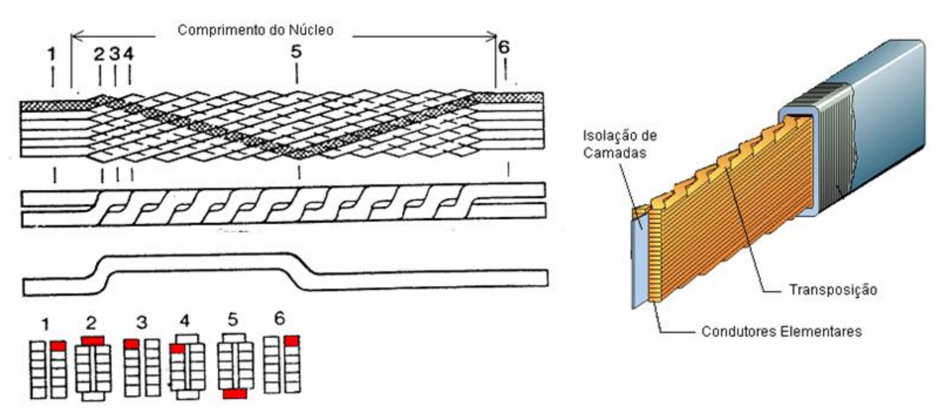


Figura 1 – formación de las transposiciones internas en una barra tipo Roebel

Para entender el fenómeno, hay que tener en mente que la diferencia de potencial entre conductores elementales o hilos de una barra Roebel puede alcanzar típicamente 2 V. Por lo tanto habrá que tomarse algún cuidado para evitar cortocircuito entre hilos.

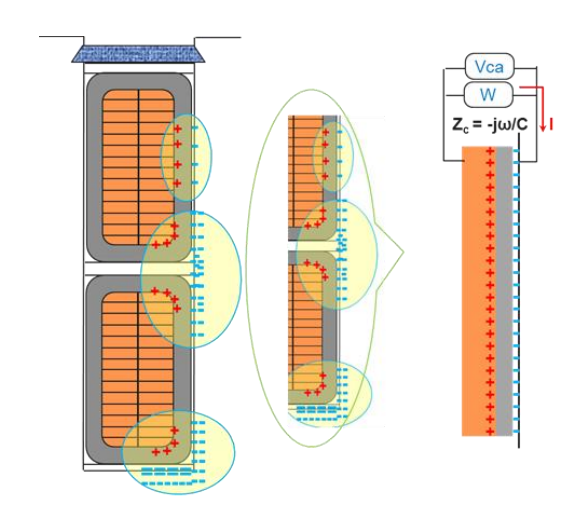


Figura 2 – Las barras Roebel vistas como capacitor

Pero todavía no es ese el foco de nuestra atención. Debemos localizar la situación en que la región circundada en rojo, en la figura 1, se encuentre bajo la acción de altos voltajes, como ocurren al término de la formación serie de un circuito paralelo de un generador.

En esas regiones cercanas a los terminales de fase, el potencial de fase para neutro estará en $U_n/(\sqrt{3})$ (para un generador con voltaje nominal de $U_n=18000$ V se tendrá $18000/(\sqrt{3})=10392,3$ V). Significa que bajo esas circunstancias se habrá instalado un campo eléctrico de elevadísimo valor bajo la forma de un capacitor, como es ilustrado en la figura 2.

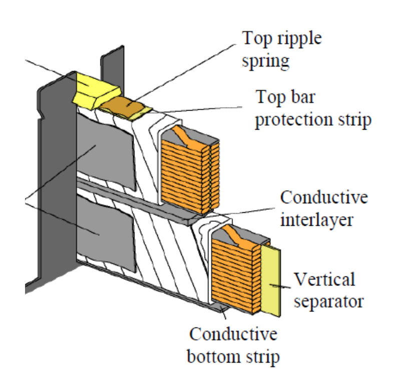
Ahora bien, si la barra fuera aislada sin que los espacios entre conductores elementales hayan sido rellenados con algún material, entonces, el aire presente en esos espacios bajo la forma de burbujas, estará sujeta a ionizarse bajo la acción de esos altísimos campos eléctricos capaces de romper con la rigidez dieléctrica del aire (típicamente para el aire seco 3 kV/mm). O sea, si la burbuja tuviera un diámetro de 1 mm, bastarían 3000 V para ionizar sus componentes y producir descargas parciales.

Volviendo a la región entre conductores elementales, circundado con rojo en la figura 1, el desafío es encontrar un material que, a la vez que rellena los espacios irregulares, sirva también como elemento homogeneizador del campo eléctrico.

Debido a esta última necesidad, dicho material deberá ser conductivo lo suficiente para servir de guía para el campo eléctrico y ser lo suficiente aislante para no permitir la circulación de corriente entre conductores elementales. Ese material es conocido como Mastic [1]. El material y su aplicación se encuentran ilustrados en la figura 3 abajo.



3.a – Mastic antes de aplicar



3.b – Mastic después de aplicar

Figura 3 – aplicación del Mastic como elemento de relleno y de homogenización del campo eléctrico.
Típicamente, conforme [2], el Mastic es una pasta "conductiva" a base de epoxi cargada de material inorgánico con resistividad del orden de los 50000 Ωm.
Ahora bien, solo a título de ejercicio de sensibilización, digamos que el área de la sección rellenada con el Mastic sea de 50 mm2 y que tenga un espesor de 1 mm. Eso representará una resistencia de 2500 Ω promovida por el Mastic. Si para efectos de simplificación tomamos 2,5 V entre conductores elementales, estaremos delante de una conducción de 1 mA o una pérdida por efecto Joule de menos de 2,5 mW. Eso si los hilos no fueran aislados. Ocurre que los hilos cuentan con un aislamiento a base de esmalte y fibra de vidrio que se encargarán de eliminar esa posibilidad de conducción.
Resumiendo, el Mastic fuera de ser un material para rellenar espacios naturales debido a la producción de las barras Roebel sirve también como guía para homogeneizar el campo eléctrico sobre la barra verde (cobre transpuesto).

3 DESCARGAS PARCIALES DE INTERFAZ

Si volvemos nuestra atención para la figura 2, notaremos que ahora estaremos sobre la superficie del aislante principal, inmediatamente antes de las paredes de la ranura. Si el trabajo realizado con el mastic fue exitoso, entonces podremos referirnos a un campo homogéneo a lo largo de la barra aislada.
El aislante bajo estas condiciones representa un elemento de gran resistencia que limita el paso de la corriente. No significa que el potencial eléctrico haya sido mitigado; de forma alguna, se mantiene tan peligroso como antes. Por eso, nuevos cuidados serán necesarios, aunque el principio es el mismo, el abordaje será personalizado.
De forma general, se trata: i) asegurar una distribución homogénea del campo eléctrico sobre el aislante principal de la barra y ii) promover una transferencia paulatina del alto potencial hasta el potencial de tierra.

3.1 Homogeneización del campo eléctrico sobre el aislante principal

Para esa finalidad se emplean, a depender del proceso adoptado, sean "tintas conductivas" o "cintas conductivas".
El empleo de tintas conductivas, por ser más tradicional, aun representa una buena parte de la preferencia de los técnicos actuantes en este rubro. Todavía, su aplicación requiere una destreza que casi se aproxima de un trabajo de arte. Esta situación, cuando aplicada en gran escala, dependerá en mucho del factor humano, donde se origina una inestabilidad típica en los controles de calidad.
Una manera de contornar ese factor y asegurar robustez al proceso de producción es la adopción de cintas denominadas conductivas.
En ambos casos, el material será a base de una tinta epoxi cargada con grafito y negro de humo.

3.2 Transferencia paulatina del alto potencial hasta el potencial de tierra

Por su vez, las paredes de la ranura también deberán ser tratadas superficialmente con un tinta de propiedades semejantes a la del Mastic; puesto que, cuando vistas por el campo eléctrico de la barra, tenga propiedad conductiva lo suficiente para ecualizar el potencial de tierra y, cuando vista por las láminas del núcleo del estator represente una resistencia lo bastante elevada para evitar que las láminas se pongan en

corto circuito. Normalmente, se trata de una tinta con cargas en suspensión que puede ser aplicada a soplete o pistola de pintar.
Alstom en particular, a más de 20 años, introdujo una solución para el empotramiento de las barras en las ranuras, al que denominamos "round packing".
Como se ilustra en la figura 4, este sistema presenta la particularidad de absorber posibles irregularidades superficiales y ofrecer una acción amortiguadora a las vibraciones a las que siempre están sometidas las barras dentro de la ranura.
Este sistema presenta una gran ventaja sobre los demás por el hecho de mitigar drásticamente la formación de descargas parciales, pues la masa a base de elastómero que se aplica entre la hoja "conductiva" asegura que se evite la formación de bolsas y burbujas de aire.
Asociado a esto, hay que añadir el sistema de resistencias conductivas en serie que permiten una transferencia suave del alto potencial de la barra para el potencial de tierra. Esa solución tecnológica nos permite decir que, cuando la barra esté empotrada en la ranura, el potencial superficial de la barra se encuentra en el mismo nivel de tierra. Como se verá más adelante, esa propiedad nos permitirá manejar con toda seguridad los gradientes de interfaz hierro-aire en la región de las cabezas de bobina.

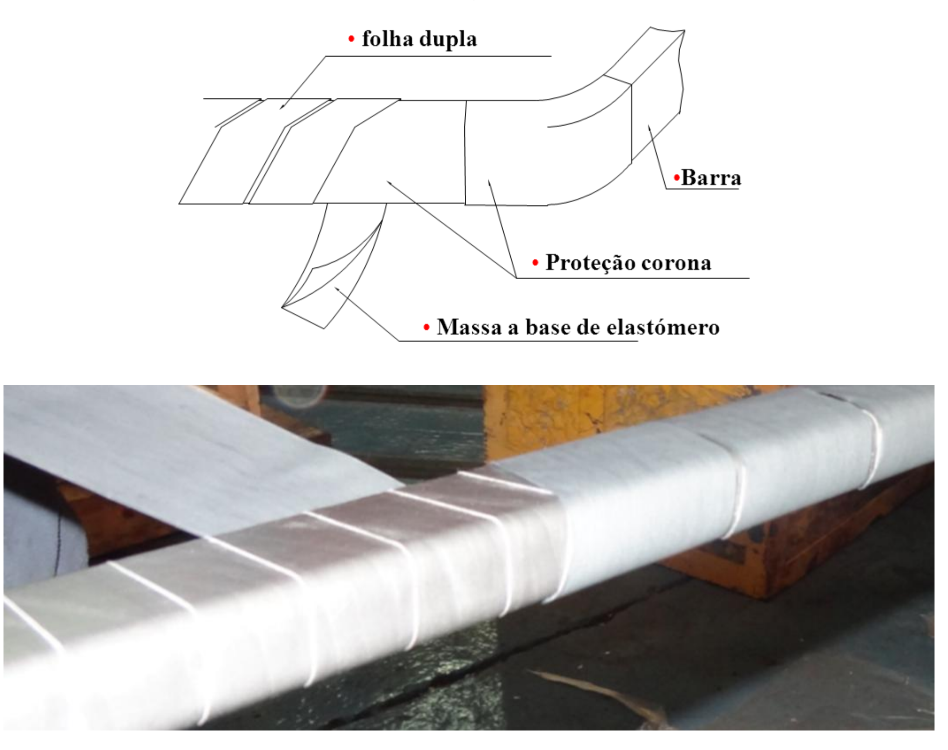


Figura 4 – sistema "roud packing" de empotramiento de barras

Como todo proceso de producción, este también tiene que permitir acompañar su condición intermediaria. Para esa finalidad, de acuerdo con la tecnología de Alstom, se ha establecido que la resistencia superficial por cuadrado del recubrimiento conductivo se encuentre en el rango de 1kΩ/cuadro a 8 kΩ/cuadro en la región de la ranura.

4 DESCARGAS PARCIALES DE SUPERFICIE EN LAS CABEZAS DE BOBINA

Como hemos visto, se han dedicado muchos esfuerzos y conocimiento a lo largo de generaciones para conseguir dominar el proceso de homogeneización del campo eléctrico en la región del interfaz entre la barra aislada y las paredes de la ranura. Ese esfuerzo por conseguir una transición suave de las altas tensiones hasta el nivel tierra permite enfrentar la transición del ambiente del interior de la ranura para el ambiente externo – aire.

Para agravar la situación, la geometría en esa región no colabora y, en algunos casos, hasta puede traer serias limitaciones a la solución clásica. Para entender mejor refirámonos a la figura 5 donde se ilustra la salida del núcleo de las bobinas.

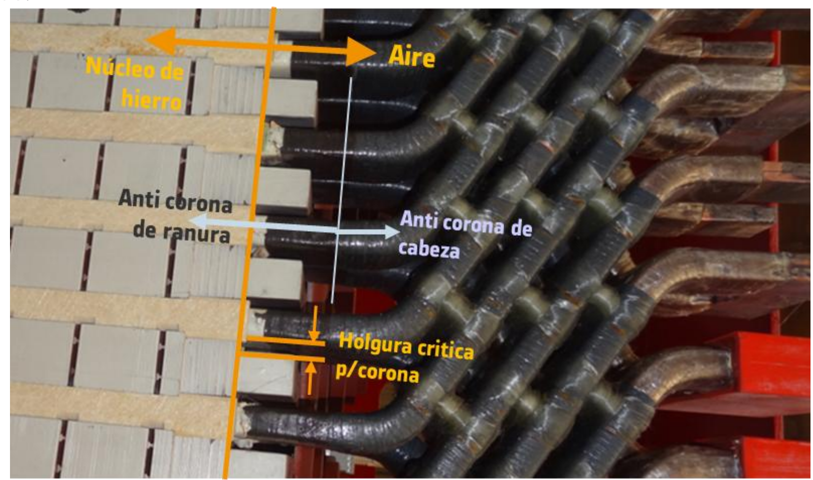


Figura 5 – Región típica de salida de las barras y cabezas de bobina

En la figura 5 el elemento agravante es la presencia de los dedos de presión que compactan el núcleo del estator. Su presencia disminuye drásticamente la holgura o paso entre barras. A ese espacio reducido de aire, lo conocemos como holgura crítica para corona. Y esa es la razón por la que la protección anti corona de ranura deba extenderse hasta unos 25 mm para delante de los dedos de presión. Puesto que de esa manera, tanto los dedos de presión como la superficie de la barra estarán en el mismo potencial de tierra, conforme descrito anteriormente. Si no se tomara este cuidado, ciertamente estaríamos delante de una región privilegiada para el surgimiento del efecto corona.

Pero, todavía no acaban las atenciones: A la salida del núcleo y cuando las barras son expuesta al aire, tan luego termina el tratamiento superficial de las barras que corresponde a la región de la ranura, se establecerá una avalancha de campo eléctrico, pues ha cambiado la rigidez dieléctrica del medio – puede verse también como una mutación de la conductancia del medio ranura para el medio aire. Esa situación ha sido bien ilustrada en [1] y [4] de donde se ha tomado el resultado de análisis por elementos finitos de la figuras 6 y 7.

La figura 8 tomada de la referencia [4] muestra una barra Roebel con su protección integral contra descargas parciales de superficie. Ese completo sistema supresor de descargas parciales es totalmente compuesto por cintas conductivas y semiconductivas.

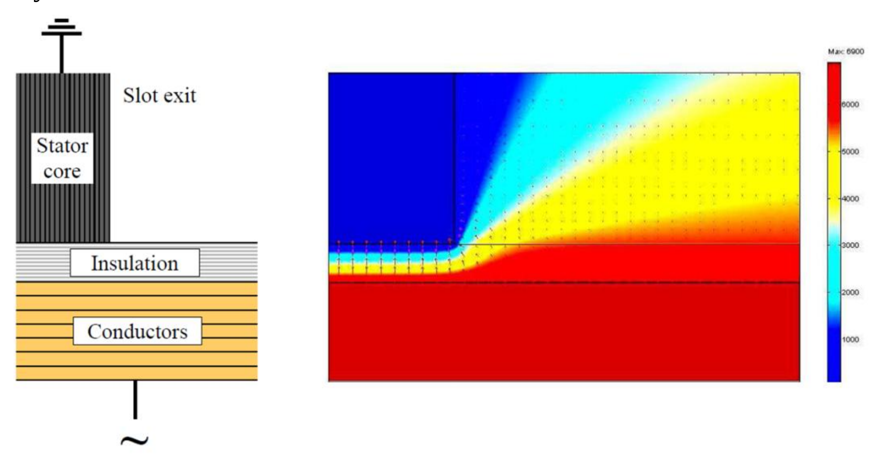


Figura 6 – Gradiente del campo eléctrico en el interfaz núcleo-aire con $15500/\sqrt{3}$ V aplicado al cobre de la barra.

Pues bien, para mitigar ese gradiente rojo de campo eléctrico se hizo necesario buscar un material que tuviera características conductivas compatibles con el fenómeno. El material que mejor respondió a esas expectativas fue el carburo de silicio por presentar una característica no lineal de resistividad. En general su aplicación es hecha bajo la forma de carga que compone una tinta epoxi ó pasta aplicada sobre una manta y después recortada en la forma de cintas.

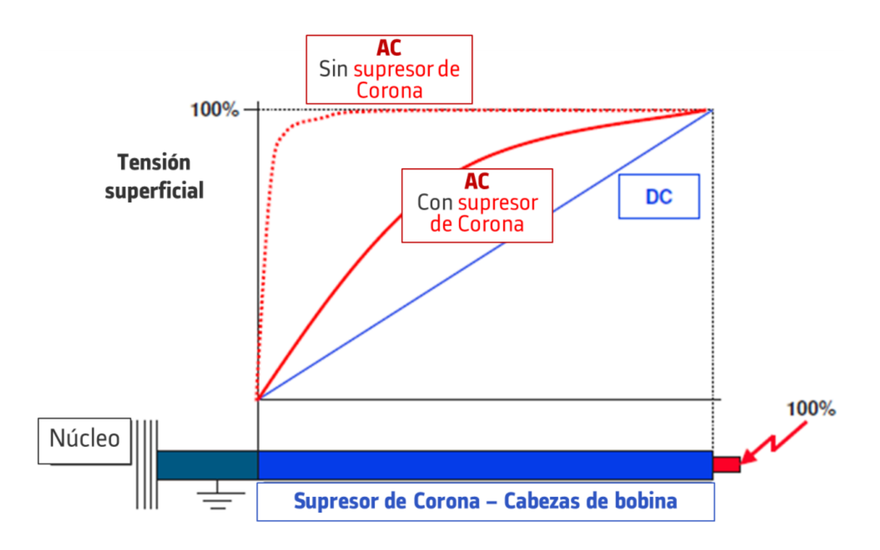


Figura 7 – acción supresora de la protección anti corona en las cabezas de bobina

La figura 7 ilustra la acción supresora del recubrimiento semiconductor. Sin la acción del mismo, el gradiente del campo eléctrico se elevaría drásticamente sin dar oportunidad que el valor nominal del campo se aleje del núcleo, lo que haría abrir arcos eléctricos ó, en lo mínimo, ocasionaría la apareción de efluvios de efecto corona. Como se puede constatar en la figura 7, la protección anti-corona de cabeza de bobina hace que el máximo campo eléctrico ocurra lejos del núcleo, en una región más controlable.
Para el control de calidad, asociado a la técnica practicada por Alstom, bajo la aplicación de una intensidad lineal de campo eléctrico que varía entre 0,46 kV/cm y 2,92 kV/cm se dejará circular una corriente superficial de 10 µA. Registrado el valor que provoca esa corriente, se podrá calcular una resistencia superficial por cuadro y por centímetro, que deberá encontrarse dentro de un rango que va desde de 46[MΩ/(cuandro.cm)] hasta 292[MΩ/(cuadro.cm)]

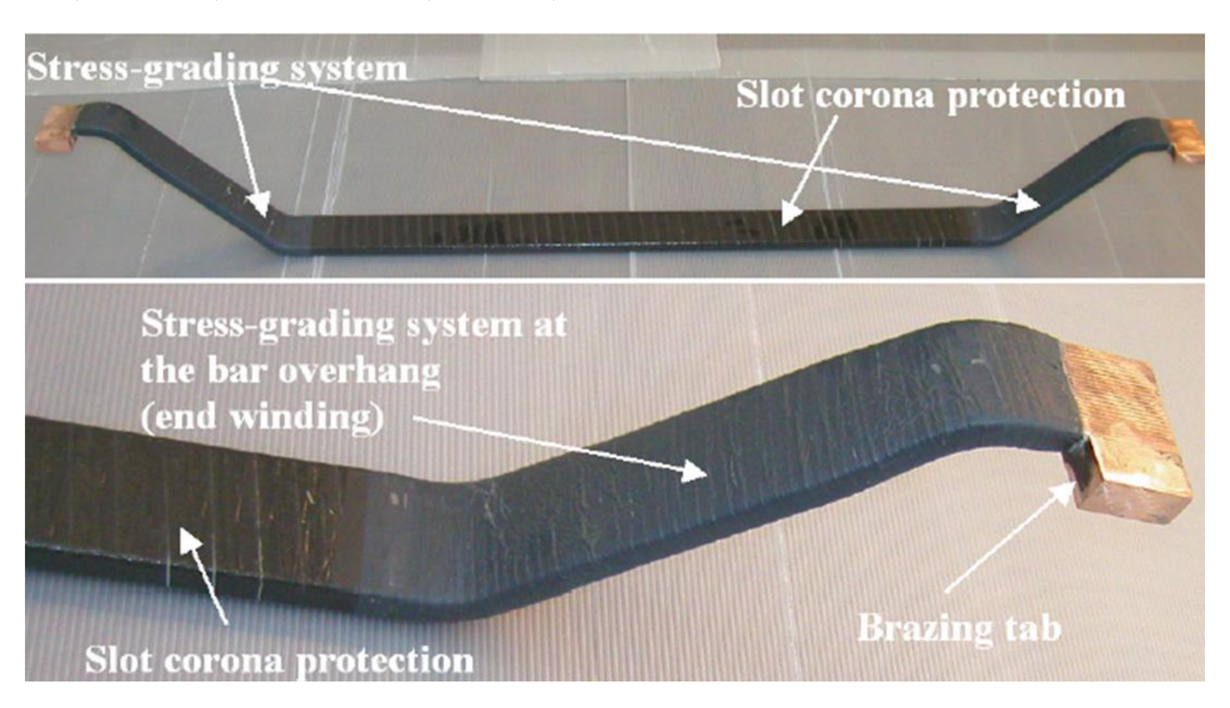
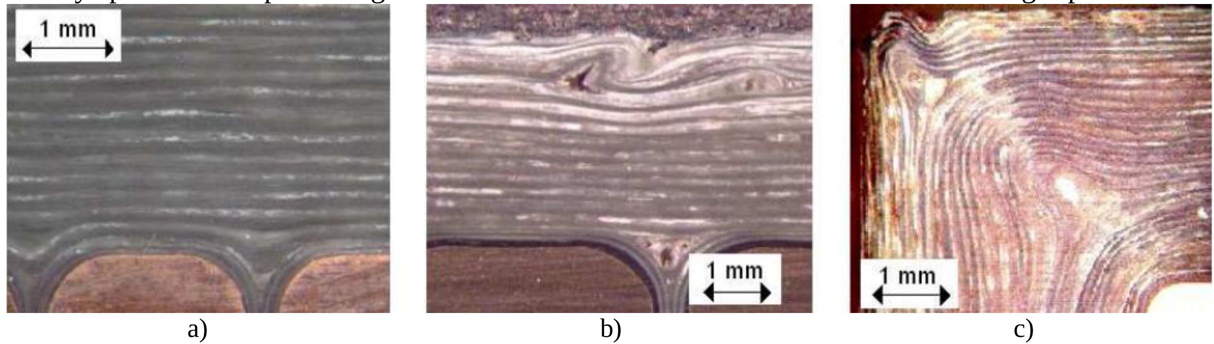


Figura 8 – sistema de supresión de descargas parciales para barras con voltaje superior a 16 kV

5 DESCARGAS PARCIALES CONSECUENTES AL PROCESO DE PRODUCCIÓN

Bajo este subtítulo se abordaran los defectos o limitaciones introducidos durante el proceso de manufactura de las barras Roebel.

En principio se asume que la resina de impregnación deberá rellenar todos los espacios sobre los cuales no se tiene un control inmediato. Ejemplo típico de esta región es la formada por las laterales de la barra verde, considerando que la cinta de mica será aplicada directamente sobre el haz de conductores de cobre que forma la barra verde. Se tendrá que en sus laterales, debido al radio del conductor elemental, estarán siempre presentes esas bolsas casi triangulares. Como no hay mucho que hacer, se espera que el proceso de impregnación al vacío (VPI) sea capaz de rellenar esas bolsas con resina.
Otra situación fortuita e imprevisible es la formación de dobladuras en la cinta de mica que compone el aislante principal.
Esos casos mencionados se encuentran retratados en la figura 9, retirados de la referencia [3]. Donde la ilustración 9.a) muestra para efectos de comparación la calidad de un aislante libre de imperfecciones. La figura 9.b) remarca la presencia de dobladura en las últimas camadas de la cinta de mica junto con espacios no bien rellanados por la resina en región entre conductores elementales. Y la figura 9.c) muestra deformaciones introducidas durante la conformación final de la barra.
Los defectos ilustrados en la figura 9, son los que en general dan lugar a descargas parciales que, por el hecho de estar ocultas, no son visibles a ojo y solo pueden ser detectadas por instrumentación apropiada.
Hay que notar que en general, estos defectos no se manifiestan instantáneamente y pueden permanecer inocuos hasta que una sobre tensión provoque la primera ruptura de la rigidez dieléctrica de la burbuja y una vez se haya producido la primera ignición se transformará en un foco recurrente de descargas parciales.



a) b) c)

Figura 9 – ejemplos de defectos típicos de producción

6 CONCLUSIONES

Como se ha visto, la creación de un sistema supresor del efecto corona demanda un profundo conocimiento tanto de los mecanismos causantes de descargas parciales, como de ciencia de materiales en todo su conjunto para entender las virtudes y limitaciones de cada material de que se considere.
La ciencia de las altas tensiones nos ayudará a entender las regiones más favorables al surgimiento de las descargas parciales y a seleccionar mejor los materiales que intervendrán en la formación del sistema supresor.
De esto, se deriva que no se puede pensar en soluciones aisladas. Hay que pensar en un sistema supresor donde cada mecanismo esté concatenado con el próximo. Como es el caso de la región de la ranura donde la solución se encuentra concatenada con la solución del empotramiento de las barras en la ranura.
La efectividad del sistema supresor de descargas parciales superficiales a la salida de la ranura, está íntimamente asociado a un discernimiento cuidadoso de las holguras de aire necesarias en el recubrimiento de la cabeza de bobina, del acabado superficial y no solamente de la calidad del recubrimiento supresor de corona.
Finalmente, una nota sobre las posibilidades de contaminación por productos oleosos, limallas de hierro, polvo industrial, etc. Se deberá poner especial atención a los plazos de vigencia de los componentes químicos y solventes, esteres o chilenos que pueden participar en el proceso de producción. Para el factor humano, se debe prestar atención a los materiales de limpieza y aseo de los operadores.

7 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Brütsch, R. and Hillmer, T. – Corona protection in high voltage Machines. INDUCTICA 2006 Conference, Berlin.

[2] Brütsch, R. et al. – New materials and techniques for the production of coils and Roebel bars. 9th INSUCON International Electrical Insulation Conference, Berlin 2002.

[3] Brütsch, R. et al. – Insulation failure mechanism of power generators. Electrical Insulation Magazine, IEEE Vol 24 Issue 4, July-Aug 2008, pg 17-25.

[4] Klamt, T. and Noel, S. – Influence of Stress-Grading System on Insulation Resistance and Polarization Index. Alstom Hydro internal document, 2008.